

doi:10.3799/dqkx.2014.032

鄂尔多斯盆地中生界低压油藏特征与形成机制

段毅¹, 曹喜喜¹, 赵阳¹, 张忠义², 余永进³, 吴应忠¹,
徐丽¹, 何金先¹, 夏嘉¹, 张晓丽¹, 赵彦德², 齐亚林²

1. 中国科学院地质与地球物理研究所油气资源研究重点实验室, 甘肃兰州 730000
2. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西西安 710021
3. 中国石油长庆油田分公司第二采油厂, 甘肃庆阳 745000

摘要: 首次对鄂尔多斯盆地中生界油藏压力进行了研究, 发现中生界油藏主要为超低压油藏, 并且不同地区和不同层位油藏的异常低压差别显著。研究结果表明, 随着地层剥蚀厚度增大和油藏抬升后温度降低值增加, 储层压力系数呈减少趋势; 延长组油藏抬升温度降低后使储层孔隙水的体积收缩量达 0.82%~1.94%。这些指示了盆地在白垩纪末期长时间强烈抬升, 地层剥蚀和古地温降低作用是形成低压油藏的主要原因。认为鄂尔多斯盆地中生界这种低压封闭体系对油藏的保存有利, 同时对油藏调整、油气运移再富集和油水分布等成藏方面可能起到了重要作用。提出了陕北地区长 6 低压油藏由东南向西北方向富集和长 7 砂岩透镜体不含水低压油气藏形成, 均与这种低压封闭体系分布密切相关。

关键词: 低压油藏; 形成机制; 含油地层; 透镜体; 中生界; 鄂尔多斯盆地。

中图分类号: TE122

文章编号: 1000-2383(2014)03-0341-09

收稿日期: 2013-05-25

Characteristics and Formation Mechanism of Mesozoic Underpressured Reservoirs in Ordos Basin

Duan Yi¹, Cao Xixi¹, Zhao Yang¹, Zhang Zhongyi², Yu Yongjin³, Wu Yingzhong¹,
Xu Li¹, He Jinxian¹, Xia Jia¹, Zhang Xiaoli¹, Zhao Yande², Qi Yalin²

1. Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China
2. Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, CNPC, Xi'an 710021, China
3. The Second Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, CNPC, Qingyang 745000, China

Abstract: The pressure characteristics of Mesozoic oil reservoirs in Ordos Basin was studied for the first time. It is found that the Mesozoic oil reservoirs are mainly ultra-underpressured ones and the abnormal underpressure difference in oil reservoirs among different regions and different layers is distinct. The results show that oil reservoir pressure coefficients exhibit a decreasing trend with the increase of eroded strata thickness and temperature drop value of oil reservoirs after, and the reservoir pore-water volume contraction amounts to 0.82%—1.94% as a result of temperature drop after uplift of Yanchang Formation oil reservoirs, which indicates that the function of strata erosion and paleotemperature decrease due to long time and strong uplift of the basin at the end of the Cretaceous result in the formation of underpressured oil reservoirs. The underpressured closed system of Mesozoic in the Ordos Basin is believed to be advantageous for oil reservoir preservation and may have played an important role in oil reservoir adjustment, re-enrichment of hydrocarbon by migration and oil and water distribution in oil reservoirs. It is concluded that Chang-6 underpressured reservoir enriched from the southeast to the northwest in the North Shaanxi area and presence of Chang-7 lenticular sandstone body reservoirs with absence of water are closely related to the distribution of such underpressured closed systems.

Key words: underpressured oil reservoir; formation mechanism; oil bearing formation; lenses; Mesozoic; Ordos Basin.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41272125).

作者简介: 段毅 (1956—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事油气地球化学、石油地质学和有机地球化学研究和教学工作。
E-mail: duany@lzb.ac.cn

0 引言

含油气盆地中异常高压的分布和演化对油气藏的形成起着重要的作用. 前人已经针对异常高压在沉积盆地中的分布特征、成因机理及其对油气成藏的作用、油气藏分布的影响有了较多的研究(陈荷立和汤锡元,1983;郝芳等,2003; Duan *et al.* , 2008; 李继亭等,2011). 可是,对于异常低压形成机理及其对油气成藏的作用的研究仍处于探索之中(杜栩等,1995;刘晓峰和解习农,2002;王宗礼等,2009;许浩等,2009).

鄂尔多斯盆地中生界油藏主要为致密油藏. 以前对这类油藏成因关注的重点放在它们是致密前、致密过程还是致密后形成的,对油藏因构造运动抬升使上覆地层遭受剥蚀后,油藏低压的形成与分布、成因机理及其对油气成藏的作用尚未研究. 由于鄂尔多斯盆地中生界油藏是致密油藏,因此,构造抬升剥蚀使储层砂体的回弹扩容作用对油气成藏的贡献不可忽略. 本文首次对鄂尔多斯盆地中生界油藏储层压力系数以及与储层压力有关的参数进行了统计,研究了油藏储层低压的分布特征、低压油藏形成机制和低压油藏分布特征与成藏机理,为鄂尔多斯盆地中生界油藏成藏提供了新的证据.

1 油藏储层低压的分布特征

1.1 储层低压的分类

储层异常低压是相对于静水压力而言的,一般来说,如果储层孔隙空间的流体压力低于静水压力,即压力系数小于 1,则称储层压力为低压或负压. 储

层异常低压的分类标准国内外学者之间存在差别. 前苏联将地层压力系数为 1.00~1.05 视为正常压力,0.8~1.0 为低压,小于 0.8 为异常低压. 但是国外大多数国家以压力系数小于 0.96 为低压,小于 0.8 为异常低压(如美国 EXXON 公司). 国内一般将压力系数为 0.9~1.1 视为正常压力,小于 0.9 为低压,小于 0.75 为超低压,这种储层压力分类标准是根据国外 260 个油气田的统计资料所确定(杜栩等,1995;王宗礼等,2009;许浩等,2009). 已有的统计表明,低压油气田占有一定的比例,例如全世界 160 个油气田中低压油气田占 11.7%(依照国外分类标准划分),全世界 210 个大中型气田中低压气田占 15.7%(依据国内分类标准划分)(杜栩等,1995). 本文采用了国内分类标准.

1.2 储层低压分布特征

对鄂尔多斯盆地中生界油藏实测储层压力系数进行了统计,结果列于表 1. 延安组储层压力系数平均值为 0.80,属于低压油藏. 可是,延 10 油层组储层压力系数较高,为 0.93,属于正常压力油藏. 延长组各油层组储层压力系数存在一定的差异性,长 2—长 8 储层压力系数平均值分布在 0.70~0.77 之间,总体上来说这些油层组油藏主要属于超低压油藏,长 9 和长 10 储层压力系数数据少,已有的数据表明,长 9 和长 10 油层组油藏属于低压油藏. 并且从表 1 还观察到,储层压力系数从长 2 至长 6 具有减小的趋势,然后从长 6 至长 10 表现为增加趋势. 储层压力系数平面分布受多种因素控制,但是同一油田或地区的相同层位油藏储层压力系数应该具有一定的可比性. 鄂尔多斯盆地西峰油田及邻近地区长 8 油层组储层压力系数较多,对这些压力系

表 1 鄂尔多斯盆地中生界油藏储层平均压力系数
Table 1 Mean pressure coefficients of Mesozoic reservoir rocks

层位	马岭	姬塬	华庆	西峰	吴旗	陕北	平均值
延 10	0.93(1)						0.93(1)
延安组	0.80(4)						0.80(4)
长 1		0.70(1)	0.86(1)			0.65(1)	0.74(3)
长 2		0.75(7)	0.81(5)		0.83(3)	0.71(4)	0.77(14)
长 3			0.71(16)			0.74(2)	0.71(18)
长 4+5		0.67(7)	0.69(2)			0.84(2)	0.72(11)
长 6			0.63(8)		0.69(5)	0.71(35)	0.70(48)
长 7			0.83(2)				0.70(1)
长 8			0.74(10)	0.76(16)			0.75(26)
长 9		0.75(1)					0.75(1)
长 10						0.79(1)	0.79(1)

注:括号内数字为样品数;压力系数资料来自长庆油田,为实测数据.

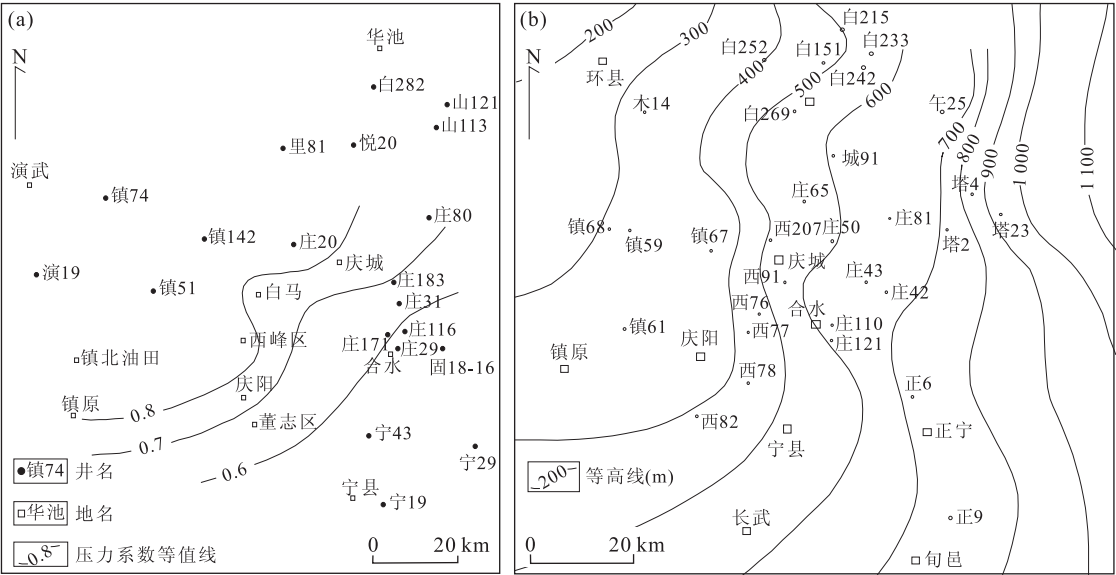


图 1 长 8 储层压力系数等值线(a)和早白垩世末期地层剥蚀厚度等值线(b)

Fig. 1 Isopach map of pressure coefficients of Chang-8 reservoir rocks (a) and erosion thickness of strata in the end of Early Cretaceous (b)

数研究表明(图 1a),从东南向西北,长 8 油层组储层压力系数具有增加的趋势.

2 低压油藏形成机制

低压油藏形成的原因较多.一般来说,主要包括地质构造抬升剥蚀反弹、地温降低作用、地下水流动作用、油气大量散失作用、化学渗透作用、埋深增大过程中原始压力保存作用等(邹华耀等,2003;王宗礼等,2009;许浩等,2009).对于鄂尔多斯盆地中生界低压油藏形成来说,地质构造抬升剥蚀反弹和地温降低作用可能是主要原因.

2.1 构造抬升剥蚀作用

由于地质构造运动使上覆地层抬升遭受剥蚀,会引起垂向应力减小,从而岩石骨架就会像弹性固体那样发生反弹,引起岩石孔隙体积的扩容,导致流体压力的降低(Neuzil, 1986, 1993; Toth and Corbet, 1986; Corbet and Bethke, 1992; 姜振学等, 2004; 田丰华等, 2007).如果地层密封好,免于外来流体侵入的影响,就会使反弹扩容引起的低压保存在地层中.图 2 为鄂尔多斯盆地地层剥蚀厚度与中生界储层压力系数相关图,从图中可以看出,随着地层剥蚀厚度增大,中生界油藏储层压力系数具有变小的趋势,即储层低压现象更明显.图 1a 展示了相似的规律,即从东南向西北,长 8 油层组储层压力系数具有增加的趋势,与其上覆地层剥蚀厚度变薄相

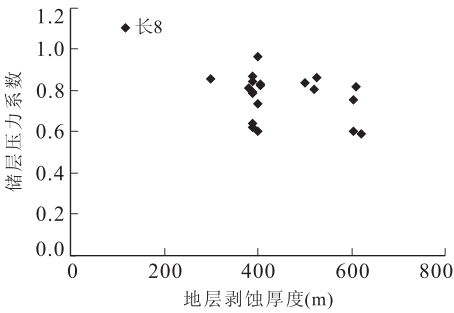


图 2 长 8 储层压力系数与地层剥蚀厚度相关图

Fig. 2 Cross plots of pressure coefficients of Chang-8 reservoir rocks vs. erosion thickness of strata

一致(图 1b).这些反映了鄂尔多斯盆地巨厚地层的剥蚀是中生界储层低压形成的重要因素,并且是主要原因.

同时,储层异常低压产生的条件可用一个无量纲数 m^* 来判别(邹华耀等, 2003): $m^* = S_s v l^2 / h K$ (S_s 为储水系数; v 为剥蚀速率; l 为岩层自剥蚀开始后 t 时刻的厚度; h 为“封闭”层在剥蚀前的垂直厚度; K 为水力传导率).鄂尔多斯盆地中生界延安组和延长组地层水矿化度很高.例如,在陕北地区、姬塬地区和天环坳陷南段,延安组和延长组各油层组地层水的平均总矿化度分布在 34.2~112.0 g/L 之间(图 3)(张小莉, 1999; 惠潇和田永强, 2008),并且主要为 CaCl 型水,反映了延安组和延长组储层总体上封闭条件好.另一方面,鄂尔多斯盆地中生界地质构造稳定,盆地内部变形构造很微弱,区域构造呈

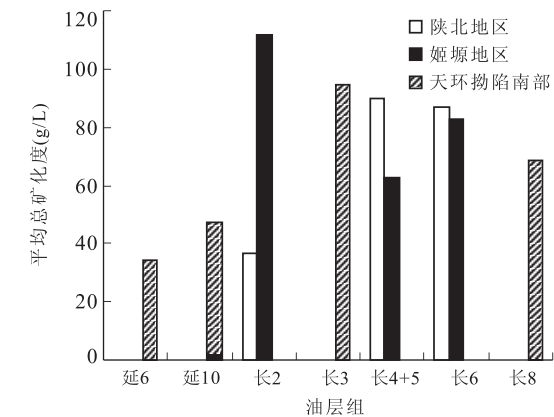


图 3 中生界延安组和延长组储层水的平均总矿化度直方图
Fig. 3 Histogram of average total salinity of formation water in Yanan and Yanchang Formations

现西倾的平缓大单斜,倾角不到 1° .同时,延长组为湖相—三角洲相沉积,深湖相长 7 泥岩和其他油层组中小层泥岩、小段泥岩发育,例如西峰油田泥岩总厚度达 700 m(段毅等,2005);延安组地层主要由河流相和湖沼相沉积构成,各油层组顶部泥岩和煤层发育,并且其中小层泥岩和小段泥岩也非常发育(刘军锋等,2011),这些泥岩层和煤层都起到了隔层封闭作用.这些石油地质特征也说明了延安组和延长组储层封闭条件好.因此,可以应用 m^* 判别延安组和延长组储层上覆地层剥蚀后,其是否形成异常低压.通过计算, m^* 值列于表 2,其中最大埋深是根据各个井区地层埋藏史研究所获得(图4),最大剥蚀

表 2 m^* 值分布

Table 2 Distribution of m^* values

	古峰庄	姬塬	白豹	西峰	洛川
最大埋深(m)	3 015	3 150	3 300	3 000	3 015
最大剥蚀厚度(m)	630	600	1 100	630	1 500
最大残余厚度(m)	2 385	2 550	2 200	2 370	1 515
最大剥蚀时 m^*	0.042	0.044	0.057	0.042	0.040

厚度数据是来自各个井区地层剥蚀厚度恢复资料(图 1b).一般来说,当 m^* 值大于 $2\times 10^{-2}\sim 8\times 10^{-2}$ 时,在“封闭”层的中心可以产生低压,并且这种低压可以保持到“封闭”层被完全剥蚀之前(邹华耀等,2003).由表 2 可知,在鄂尔多斯盆地不同地区,中生界最大剥蚀时 m^* 值分布在 $4.0\times 10^{-2}\sim 5.7\times 10^{-2}$,说明延安组和延长组各油层组储层由于其上覆地层大量剥蚀已经形成了低压,并且由于储层封闭条件好,使储层这种低压保留至今.

另外,从表 1 可以看出,长 6 储层砂岩平均压力系数最低.已有的研究表明,在上覆地层抬升遭受大量剥蚀引起岩石孔隙体积扩容过程中,泥页岩的扩容率大于砂岩.长 6 油层组与其下部长 7 泥岩相邻,当上覆岩层被剥蚀时,长 7 泥岩扩容率大于长 6 储层砂岩,在由低压产生的纵向压力梯度驱动作用下,长 6 储层砂岩中的部分水向长 7 泥页岩渗透,可能进一步降低了相邻长 6 储层砂岩的流体压力,从而使长 6 储层砂岩平均压力系数最低.

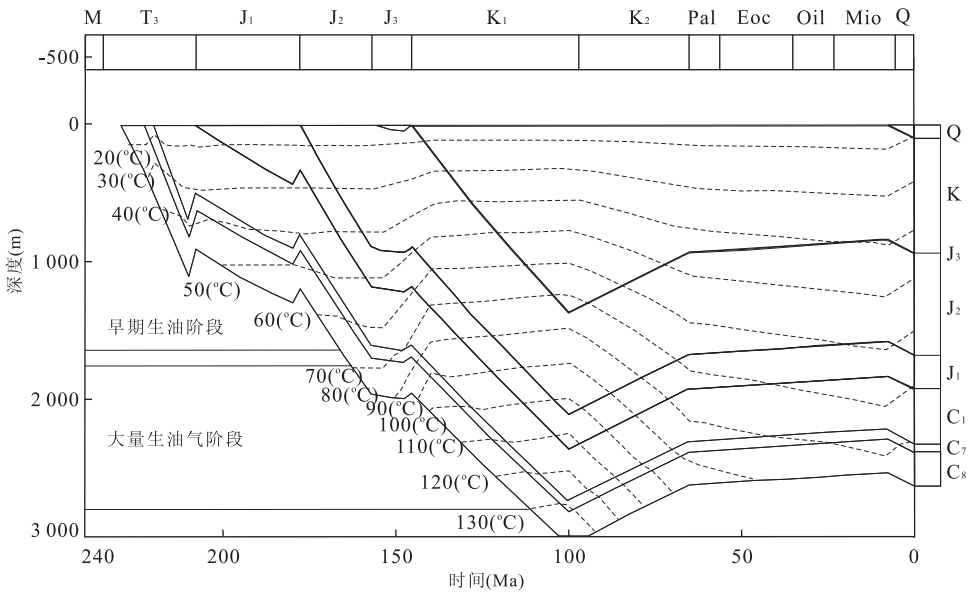


图 4 峰 7 井中生界地层埋藏史
Fig. 4 Stratigraphic burial history of Mesozoic strata in well Feng 7

表 3 长 7 烃源岩最大古地温和延长组油藏二期成藏古地温

Table 3 The max paleogeothermal for Chang-7 source rocks and paleotemperature of the second stage of Yanchang Formation reservoir forming

	古峰庄	姬塬	白豹	西峰	洛川
早白垩世长 7 烃源岩最大埋深(m)	2 800	2 850	2 950	2 300	2 000
长 7 烃源岩生烃最大古地温(℃)	130	125	130	110	100
二期成藏古温度(℃)	110	110	110	100	100

注:长 7 烃源岩生烃最大古地温根据地层埋藏史和热演化史研究所获得;二期成藏古温度为储层包裹体均一温度。

2.2 地温降低作用

储层及其中流体温度的降低,也是低压油藏形成的因素之一.如图 1b 和图 4 所示,在早白垩世末期,鄂尔多斯盆地地质构造运动使延长组上覆地层遭受剥蚀,造成延长组油藏抬升后,储层及其中流体温度就会降低,从而导致储层岩石骨架及其中孔隙流体体积变小.一般来说,随着地温降低,岩石骨架孔隙体积变小量远远小于孔隙流体体积变小量;已有的研究表明,地温降低 1℃,地层卤水体积的变化是岩石孔隙体积变化的 44 倍多(岩石的膨胀系数为 $9 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$,地层卤水的膨胀系数为 $400 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$;Hodgman, 1957),这样就可以产生油藏异常低压;同时,油藏中原油随着地温降低体积变小,这对油藏异常低压的形成也有一定的贡献.对于鄂尔多斯盆地中生界延长组油藏来说,第 2 期成藏是该油藏的主要成藏期.笔者对延长组油藏储层油气包裹体均一温度进行了分析,结果表明,二期成藏的油气包裹体均一温度在古峰庄、姬塬和白豹地区

为 110℃,在西峰和洛川地区为 100℃(表 3);油气包裹体均一温度代表了油藏成藏温度.同时,笔者对鄂尔多斯盆地延长组各油层组油藏现今平均温度进行了统计,发现不同地区延长组油藏现今平均温度差别比较大,同一地区不同油层组油藏现今平均温度差别比较小,并且随着油层组深度增加差别具有减少趋势(表 4).因此,同一地区不同油层组油藏现今平均温度可以代表该地区油藏现今温度,这样姬塬、华庆、西峰、吴旗和陕北地区油藏平均现今温度分别为 64.8℃、58.3℃、66.1℃、52.6℃和 40.1℃;并且可以估计主要成藏时油藏的温度与现今油藏的平均温度之间的差值 ΔT ,该值反映了延长组油藏抬升后油藏温度在姬塬、华庆(白豹)、西峰和陕北(洛川)地区分别平均降低了(ΔT)45.2℃、51.7℃、33.9℃和 59.9℃,这种大幅度储层温度降低对低压油藏起到了一定的作用.同时,从长 8 油层组油藏抬升后油藏温度降低值与储层压力系数相关图中发现(图 5),随着油藏温度降低值增加,储层压力系数减少,说明油藏温度降低贡献于储层低压形成.因此,延长组油藏温度的降低对延长组油藏异常低压的形成起到了一定的作用.

夏新宇和宋岩(2001)提出公式: $V = nV_0[1 + \alpha_f(T - T_0) - \beta_f(P - P_0)]$ (地层水膨胀系数 $\alpha_f = 4 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$;地层水压缩系数 $\beta_f = 3 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$; V 为体积; T 为温度; P 为压力),可以估计由于构造抬升温度降低后,地层孔隙水体积的收缩量.如上所述,延长组储层总体上封闭条件好,因此这个公式也适合鄂尔多斯盆地延长组油藏.笔者根据以前油藏包裹体温度与油藏现今温度以及油藏包裹体捕获压力与油藏现今压力的研究成果,对鄂尔多斯盆地延长组

表 4 鄂尔多斯盆地延长组各油层组油藏现今平均温度(℃)
Table 4 Average current temperature of Yanchang Formation (℃)

层位	姬塬	华庆	西峰	吴旗	陕北
长 1	61.6(1)				38.6(3)
长 2	62.9(6)	51.5(6)		47.6(2)	31.5(14)
长 3		57.0(12)			
长 4+5	69.9(5)	60.9(2)			44.8(4)
长 6		62.7(5)		57.5(7)	45.6(56)
长 7		59.6(1)			
长 8		63.5(8)	66.1(11)		
长 10					
平均	64.8	58.3	66.1	52.6	40.1
ΔT	45.2	51.7	33.9		59.9

注:括号内数字为样品数; ΔT 为成藏二期成藏温度与现今油藏平均温度之差,即油藏抬升后平均降低温度。

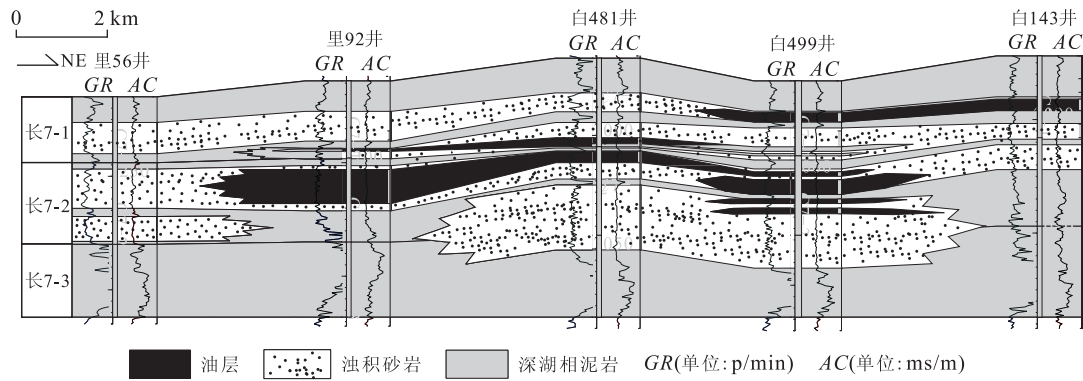


图 7 长 7 油藏剖面图
Fig. 7 Chang-7 Oil reservoir profile

升前形成的油气发生运移再富集,其证据是这种异常负压分布趋势与陕北地区油藏储量规模由安塞地区向西北方向增大相一致。目前发现的长 7 砂岩透镜体油气藏都是不含水低压油气藏(图 7),它们都是盆地抬升剥蚀所形成。长 7 沉积期是鄂尔多斯盆地延长期湖盆发育的鼎盛时期,深湖相沉积广布,沉积的泥岩厚度大(最厚可达 50~60 m),泥岩中有机质丰富,是盆地中生界最好的烃源岩。长 7 沉积期三角洲前缘砂体和半深湖—深湖浊积砂体发育,特别是长 7 浊积砂体是好的储集体。长 7 浊积砂体呈透镜体被长 7 烃源岩所包围,长 7 优质烃源岩生成的油气在异常高压驱动下进入浊积砂透镜体中,形成透镜体高压油气藏。白垩纪末期盆地抬升剥蚀,引起岩石骨架反弹使孔隙体积扩容,岩层形成低压。Fatt (1958)和 McLatchie *et al.* (1958)对砂岩孔隙的弹性收缩率进行了实验研究,结果发现,上覆地层剥蚀过程中,砂岩储层孔隙的扩容率与收缩率相当,泥页岩的扩容率大于砂岩。这样,由于泥岩孔隙体积扩容大于砂岩,泥岩形成低压更明显,从而促使砂岩透镜体中的孔隙水向泥岩运移,同时进一步降低了砂岩透镜体中的压力,形成了现今长 7 砂岩透镜体不含水低压油气藏。

4 结论

鄂尔多斯盆地中生界油藏主要为致密油藏。目前缺乏对这类油藏因构造抬升上覆地层剥蚀后其发生变化的研究。本文首次对鄂尔多斯盆地中生界油藏压力进行了研究。中生界油藏储层压力系数平均值为 0.70~0.77,主要属于超低压油藏;并且储层压力系数因地区和层位不同变化明显。反映异常低压产生条件的无维数 m^* 值分布范围、地层剥蚀厚

度和油藏抬升后温度降低值与储层压力系数负相关性、估计的因油藏抬升温度降低后造成 0.82%~1.94%储层孔隙水的体积收缩量,均指示了中生界低压油藏主要由地质构造抬升地层剥蚀和地温降低作用所形成。

鄂尔多斯盆地白垩纪末期抬升剥蚀形成的低压封闭体系,对早期形成的油藏保存无疑起到了积极作用;同时,形成的低压体系对油藏调整、油气运移再富集和油水分布等成藏方面可能产生了重要的影响。根据陕北地区长 6 低压油藏储量富集与储层低压分布的关系,以及长 7 砂岩透镜体低压油气藏不含水特征,提出了这些油藏的形成均与这种低压封闭体系相关。

References

Chen, H. L., Tang, X. Y., 1983. A Discussion on the Compaction of Argillaceous Rocks and Primary Migration of Oil and Gas in Dongying Sag of Shandong Province. *Acta Petrolei Sinica*, 4(2): 9—16 (in Chinese with English abstract).

Corbet, T. F., Bethke, C. M., 1992. Disequilibrium Fluid Pressures and Groundwater Flow in the Eastern Canada Sedimentary Basin. *Journal of Geophysical Research*, 97(B5): 7203—7217. doi:10.1029/91JB02993

Du, X., Zheng, H. Y., Jiao, X. Q., 1995. Abnormal Pressure and Hydrocarbon Accumulation. *Earth Science Frontiers*, 2(3—4): 137—148 (in Chinese with English abstract).

Duan, Y., Wang, C. Y., Zheng, C. Y., et al., 2008. Geochemical Study of Crude Oils from Xifeng Oilfield of Ordos Basin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 31(4—6): 341—356. doi:org/10.1016/j.jseae.2007.05.003

Duan, Y., Wu, B. X., Zheng, C. Y., et al., 2005. Pool-

- Forming Dynamic Properties of Xifeng Oilfield in Ordos Basin, *Acta Petrolei Sinica*, 26(4): 29—33 (in Chinese with English abstract).
- Fatt, I., 1958. Compressibility of Sandstones at Low to Moderate Pressure. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 42(12): 1924—1957.
- Hao, F., Dong, W. L., Zou, H. Y., et al., 2003. Overpressure Fluid Flow and Rapid Accumulation of Natural Gas in Yinggehai Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 24(6): 7—12 (in Chinese with English abstract).
- Hodgman, C. D., 1957. Handbook of Chemistry and Physics. Chemical Rubber Publishing Corporation, Cleveland, Ohio, 3213.
- Hui, X., Tian, Y. Q., 2008. Hydrogeologic Features and Enrichment Laws of Oil Reservoirs in South Tianhuan Depression, Ordos Basin. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 30(3): 278—282 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z. X., Pang, X. Q., Jin, Z. J., et al., 2004. Relationship between Pore Variation of Reservoir and Rebounding of Sandstone during Uplift and Its Application to the Daqing Oilfield. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(4): 420—426 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. T., Zeng, J. H., Wu, J. P., 2011. Application of Typical Profile to Analysis of Reservoir Pressure Evolution and Hydrocarbon Accumulation in Dongying Sag. *Lithologic Reservoirs*, 23(4): 58—64 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. F., Duan, Y., Liu, Y. C., et al., 2011. Formation Conditions and Mechanism of Oil Reservoir in Maling Oilfield, Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(2): 410—416 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. F., Xie, X. N., 2002. Origin and Characteristics of under Pressure Systems in Dongying Depression. *Oil & Gas Geology*, 23(1): 66—69 (in Chinese with English abstract).
- McLatchie, A. S., Hemstock, R. A., Young, J. W., 1958. The Effective Compressibility of Reservoir Rock and Its Effect on Permeability. *Journal of Petroleum Technology*, 10(6): 49—51. doi: 10. 2118/894—G
- Neuzil, C. E., 1986. Groundwater Flow in Low-Permeability Environments. *Water Resources Research*, 22(8): 1163—1195. doi: 10. 1029/WR022i008p01163
- Neuzil, C. E., 1993. Low Fluid Pressure within the Pierre Shale: A Transient Response to Erosion. *Water Resources Research*, 29(6): 2007—2020. doi: 10. 1029/93WR00406
- Tian, F. H., Jiang, Z. X., Zhang, X. B., et al., 2007. Preliminary Study on Contribution of Rift-Erosion to Oil and Gas Accumulation. *Acta Geologica Sinica*, 81(2): 273—279 (in Chinese with English abstract).
- Toth, J., Corbet, T., 1986. Post-Paleocene Evolution of Regional Groundwater Flow-Systems and Their Relation to Petroleum Accumulations, Taber Area, Southern Alberta, Canada. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 34(3): 339—363.
- Wang, Z. L., Li, J., Lin, S. G., et al., 2009. Forming Mechanism and Distribution of Low Pressure Reservoirs in Southeast Uplift of Southern Songliao Basin. *Natural Gas Geoscience*, 20(2): 216—221 (in Chinese with English abstract).
- Xia, X. Y., Song, Y., 2001. Temperature Effects on Geopressure during Deposition and Erosion. *Petroleum Exploration and Development*, 28(3): 8—13 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H., Zhang, J. F., Tang, D. Z., et al., 2009. The Study Status and Tendency of Low Pressure. *Advances in Earth Science*, 24(5): 506—511 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. L., 1999. Characteristics of Low Resistivity Oil Reservoir in Yanchang Formation of Shanbei Triassic System and Its Origin. *Well Logging Technology*, 23(4): 276—287 (in Chinese with English abstract).
- Zou, H. Y., Hao, F., Cai, X. Y., 2003. Summarization of Subnormal Pressures and Accumulation Mechanisms of Subnormally Pressured Petroleum Reservoirs. *Geological Science and Technology Information*, 22(2): 45—50 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈荷立, 汤锡元, 1983. 山东东营凹陷泥岩压实作用及油气初次运移问题探讨. *石油学报*, 4(2): 9—16.
- 杜棚, 郑洪印, 焦秀琼, 1995. 异常压力与油气分布. *地质前缘*, 2(3—4): 137—148.
- 段毅, 吴保祥, 郑朝阳, 等, 2005. 鄂尔多斯盆地西峰油田油气成藏动力学特征. *石油学报*, 26(4): 29—33.
- 郝芳, 董伟良, 邹华耀, 等, 2003. 莺歌海盆地汇聚型超压流体流动及天然气晚期快速成藏. *石油学报*, 24(6): 7—12.
- 惠潇, 田永强, 2008. 鄂尔多斯盆地天环拗陷南段水文地质特征与油藏富集规律. *地球科学与环境学报*, 30(3): 278—282.
- 姜振学, 庞雄奇, 金之钧, 等, 2004. 地层抬升过程中的砂体回弹作用及其油气成藏效应. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(4): 420—426.
- 李继亨, 曾溅辉, 吴嘉鹏, 2011. 利用东营凹陷典型剖面分析

地层压力演化与油气成藏关系. 岩性油气藏, 23(4): 58—64.

刘军锋, 段毅, 刘一仓, 等, 2011. 鄂尔多斯盆地马岭油田成藏条件与机制. 沉积学报, 29(2): 410—416.

刘晓峰, 解习农, 2002. 东营凹陷低压系统的特征及成因机制. 石油与天然气地质, 23(1): 66—69.

田丰华, 姜振学, 张晓波, 等, 2007. 地层抬升剥蚀对油气成藏贡献初探. 地质学报, 81(2): 273—279.

王宗礼, 李君, 林世国, 等, 2009. 松辽盆地南部东南隆起区低压油气藏形成机制及分布特征研究. 天然气地球科学, 20(2): 216—221.

夏新宇, 宋岩, 2001. 沉降及抬升过程中温度对流体压力的影响. 石油勘探与开发, 28(3): 8—13.

许浩, 张君峰, 汤达祯, 等, 2009. 低压油气藏形成机制研究现状及发展趋势. 地球科学进展, 24(5): 506—511.

张小莉, 1999. 陕北三叠系延长组低阻油层特性及其形成机理分析. 测井技术, 23(4): 276—287.

邹华耀, 郝芳, 蔡勋育, 2003. 沉积盆地异常低压与低压油气藏成藏机理综述. 地质科技情报, 22(2): 45—50.

《地球科学——中国地质大学学报》
2014 年 4 月 第 39 卷 第 4 期 要目预告

岩体结构面产状测量的钻孔摄像技术及其可靠性	曹洋兵等
岱海湖盆沿坡流与顺坡流相互作用的沉积响应	陈彬滔等
东乌旗罕乌拉韧性剪切带的构造属性及其年代约束	程银行等
利用信噪分离方法提高大地电磁张量阻抗估算质量	崔金岭等
石笋碳酸盐假性热释光: 古环境的新指标	廖 金等
黄河源区植被对活动层温度和水分的影 响	罗栋梁等
黔东震旦—寒武系转换期碎屑锆石年龄及其地质意义	杨恩林等
绿泥石对 CO ₂ —水—岩石相互作用的影响	杨国栋等
鄂尔多斯盆地华池长 8 储层成岩相与孔隙度演化	张 创等
黄河三角洲全新世以来沉积环境的划分及各环境中碳埋藏速率的评价	赵广明等